

高职高专“十二五”规划教材



金属材料及热处理

冯英宇 编著

JINSHU
CAILIAO JI
RECHULI



化学工业出版社

高职高专“十二五”规划教材

金属材料及热处理

冯英宇 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书根据就业岗位对金属材料相关知识和应用能力的要求,对传统的课程内容和课程结构进行了遴选和重构。按照“任务提出→任务分析→相关知识→任务实施”的顺序对课程内容进行序化,采用模块化设计,以生产实际案例和生活常识为切入点,内容安排合理,深浅适宜,注重工程应用,强调职业特征,使学生由浅入深,从具备金属材料的基础概念和初步鉴别能力,到掌握金属材料的本质和具备显微鉴别能力,再到具备金属材料及热处理的工程应用能力。

本书共分九个模块,分别是金属的力学性能、金属的晶体结构、金属的结晶、铁碳合金、金属的塑性变形与再结晶、钢的热处理、工业用钢、铸铁、非铁合金,并有综合训练和实验。为方便教学,配套电子教案。

本书可作为高等职业技术教育和高等专科学校的材料成形、焊接以及机械制造类专业教材,也可作为成人大专、职工培训和继续教育教材,并可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料及热处理/冯英宇编著. —北京:化学工业出版社,2012.5

高职高专“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-14083-8

I. 金… II. 冯… III. ①金属材料-高等职业教育-教材②热处理-高等职业教育-教材 IV. ①TG14②TG15

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第074449号

责任编辑:韩庆利

文字编辑:张绪瑞

责任校对:边涛

装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张14 $\frac{3}{4}$ 字数371千字 2012年6月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:28.00元

版权所有 违者必究

前言

本书是为高等职业技术学院和高等专科学校的材料、机制及相近专业编写的改革教材。本书在编写过程中充分突出了职业技术教育的特点,在内容安排上选择了与生产实践相关的题材。

本书以“基于工作任务的引导”的课程体系为基础,根据高职机械类专业就业岗位对金属材料相关知识和应用能力的要求,对传统的课程内容和课程结构进行了遴选和重构。课程内容的遴选是根据高职机械类大多数专业的培养目标中对金属材料理论知识及应用能力要求,突出理论与实践的“前因后果”关系;课程内容的重构是遵循学生的认知规律,按照“任务提出→任务分析→相关知识→任务实施”的顺序对课程内容进行序化,采用模块化设计,以生产实际案例和生活常识为切入点,内容安排合理,深浅适宜,注重工程应用,强调职业特征,使学生由浅入深,从具备金属材料的基础概念和初步鉴别能力,到掌握金属材料的本质和具备显微鉴别能力,再到具备金属材料及热处理的工程应用能力。

本教材共分九个模块,分别是金属的力学性能、金属的晶体结构、金属的结晶、铁碳合金、金属的塑性变形与再结晶、钢的热处理、工业用钢、铸铁、非铁合金。通过本教材的学习,可使学生获得金属的成分、组织结构和力学性能间的关系及其变化规律的基本理论、基本知识和基本技能,了解工程产品的热处理原理及工艺方法,初步具备正确选择和合理使用金属材料的能力,为学习机械冷、热加工类专业课以及在相关岗位从事生产工作打下基础。

本书可作为高等职业技术教育和高等专科学校的材料成形、焊接以及机械制造类专业教材,也可作为成人大专、职工培训和继续教育教材,并可供工程技术人员参考。

本教材在编写过程中参考了大量的文献资料,在此谨向所有参考文献的作者以及对本教材编写给予了大力支持的有关企业、专家表示衷心的感谢!

本书有配套电子教案,可赠送给用本书作为授课教材的院校和老师,如果需要,可发邮件至 hqlbook@126.com 索取。

尽管我们在教材建设的特色方面做出了许多努力,但由于编者水平有限,教材中仍可能存在一些疏漏和不妥之处,恳请各教学单位和读者在使用本教材时多提宝贵意见,以便下次修订时改进。

编者

目 录

● 模块一 金属的力学性能

1

□ 课题一 强度与塑性	1
一、载荷、变形与应力	2
二、金属室温静拉伸试验	2
三、金属的弹性变形	4
四、强度与强度指标	5
五、塑性与塑性指标	6
综合训练	7
□ 课题二 硬 度	8
一、布氏硬度试验	8
二、洛氏硬度试验	10
三、维氏硬度试验	11
综合训练	13
□ 课题三 冲击韧性与疲劳极限	13
一、冲击韧性	14
二、疲劳极限	15
综合训练	17
□ 知识拓展	17
综合训练	20
□ 小 结	20

● 模块二 金属的晶体结构

22

□ 课题一 金属的晶体结构	22
一、金属	22
二、金属的晶体结构	23
三、金属的实际晶体结构	29
综合训练	32
□ 课题二 合金的相结构	33
一、合金的基本概念	33
二、固溶体	34

三、金属化合物	36
四、机械混合物	36
综合训练	36
□ 小 结	37

● 模块三 金属的结晶 38

□ 课题一 纯金属的结晶	38
一、金属结晶的现象	38
二、金属结晶的条件	40
三、形核规律	41
四、晶核长大的规律	43
五、晶粒大小的控制	45
六、同素异晶转变	46
综合训练	47
□ 课题二 合金的结晶	47
一、二元合金相图的建立	48
二、二元匀晶相图	49
三、共晶相图	53
四、包晶相图	58
五、其他相图	61
综合训练	61
□ 小 结	62

● 模块四 铁碳合金 63

□ 课题一 铁碳合金的基本相与铁碳合金相图	63
一、铁碳合金的基本相	64
二、Fe-Fe ₃ C 相图分析	66
综合训练	70
□ 课题二 典型铁碳合金的冷却过程及组织转变	70
一、工业纯铁（含碳量小于 0.0218%）	71
二、共析钢（含碳量 0.77%）	72
三、亚共析钢（含碳量 0.0218%~0.77%）	72
四、过共析钢（含碳量 0.77%~2.11%）	73
五、共晶白口铸铁（含碳量 4.3%）	73
六、亚共晶白口铸铁（含碳量 2.11%~4.3%）	74
七、过共晶白口铸铁（含碳量 4.3%~6.69%）	75
综合训练	76
□ 课题三 含碳量对铁碳合金平衡组织和性能的影响	76
一、含碳量对平衡组织的影响	77
二、含碳量对力学性能的影响	78

三、含碳量对工艺性能的影响	78
综合训练	80
□ 课题四 Fe-Fe ₃ C 相图的应用及局限性	80
一、Fe-Fe ₃ C 相图的应用	81
二、应用铁碳合金相图应注意的问题	82
三、铁碳合金相图的局限性	82
综合训练	82
□ 课题五 碳素钢	83
一、钢中的常存杂质对钢性能的影响	83
二、碳素钢的分类、钢号和主要用途	85
综合训练	87
□ 小 结	87

● 模块五 金属的塑性变形与再结晶 88

□ 课题一 金属的塑性变形	88
一、单晶体的塑性变形	89
二、多晶体的塑性变形	91
三、合金的塑性变形	92
四、金属的塑性变形对其组织和性能的影响	94
综合训练	95
□ 课题二 冷变形金属在加热时的变化	96
一、回复	96
二、再结晶	97
三、晶粒长大	98
综合训练	98
□ 课题三 金属的热变形加工	99
一、热加工与冷加工的区别	99
二、热变形加工及其优缺点	99
三、热加工对金属组织性能的影响	100
四、热加工过程的控制	101
综合训练	103
□ 小 结	104

● 模块六 钢的热处理 105

□ 课题一 钢在加热时的组织转变	105
一、相变点	106
二、奥氏体的形成过程	106
三、影响奥氏体转变速度的因素	107
四、奥氏体长大	108
综合训练	110

□ 课题二	钢在冷却时的转变	110
一、过冷奥氏体等温转变曲线和连续冷却转变曲线		110
二、珠光体转变		112
三、马氏体转变		112
四、贝氏体转变		114
综合训练		116
□ 课题三	钢的退火与正火	116
综合训练		118
□ 课题四	钢的淬火与回火	118
一、淬火		119
二、回火		120
综合训练		122
□ 课题五	钢的表面热处理	123
一、钢的表面淬火		123
二、钢的化学热处理		124
综合训练		128
□ 知识拓展		128
综合训练		132
□ 小 结		132

● 模块七 工业用钢 135

□ 课题一	钢的分类及牌号	135
一、钢的分类		135
二、钢的牌号		136
综合训练		139
□ 课题二	结构钢	139
一、普通结构钢		140
二、优质结构钢		143
三、其他结构钢		153
综合训练		154
□ 课题三	工具钢	154
一、刃具钢		154
二、模具钢		159
三、量具钢		161
综合训练		162
□ 课题四	特殊性能钢	162
一、不锈钢		163
二、耐热钢		165
三、耐磨钢		167
综合训练		168

□ 小 结	168
-------------	-----

● 模块八 铸铁 171

□ 课题一 铸铁的石墨化	171
一、铸铁的石墨化过程	172
二、铸铁石墨化的影响因素	173
综合训练	174
□ 课题二 灰铸铁	175
一、灰铸铁的组织特点	175
二、灰铸铁的性能	175
三、灰铸铁的牌号和应用	176
四、灰铸铁的孕育处理	177
五、灰铸铁的热处理	177
综合训练	178
□ 课题三 球墨铸铁	178
一、球墨铸铁的组织 and 性能	179
二、球墨铸铁的牌号和应用	180
三、球墨铸铁的热处理	180
综合训练	183
□ 知识拓展	183
综合训练	187
□ 小 结	187

● 模块九 非铁合金 188

□ 课题一 铝合金	188
一、铝合金分类	189
二、铝合金的热处理	190
三、变形铝合金	191
四、铸造铝合金	192
综合训练	194
□ 课题二 铜合金	194
一、黄铜	195
二、青铜	197
综合训练	200
□ 知识拓展	200
综合训练	203
□ 小 结	203

● 实验指导书 204

□ 实验一 盐类结晶过程的观察	204
-----------------------	-----

□ 实验二	显微试样的制备	206
□ 实验三	铁-碳合金平衡组织的观察	213
□ 实验四	钢的热处理	217
□ 实验五	钢的不平衡组织观察	221
□ 实验六	铸铁组织观察	223

● 参考文献

226

模块一 金属的力学性能

【学习目标】

知识点

1. 理解金属的常用力学性能指标的含义及计算方法；
2. 理解金属的常用力学性能对材料的应用范围和产品质量及工艺性能的影响；
3. 了解常用物理性能和化学性能对材料的应用范围和产品质量及工艺性能的影响。

技能点

1. 掌握常用力学性能指标硬度测试方法及其应用；
2. 了解强度、塑性、冲击韧性以疲劳极限等力学性能指标的测试方法及其应用；
3. 能根据机件或工具的工作条件，分析对其制造材料力学性能的要求。

金属材料之所以被广泛地应用在各个领域，是由于它具有许多优良的性能。金属材料的性能包含使用性能和工艺性能两个方面。使用性能是指金属材料在使用条件下表现出来的性能，它包括力学性能、物理性能和化学性能等。使用性能的好坏，决定了它的使用范围和使用寿命。而工艺性能是指金属材料在加工制造过程中适应加工的性能，它包括铸造性能、锻压性能、焊接性能、热处理性能及切削加工性能等。工艺性能直接影响零件加工后的工艺质量，是选材和制订零件加工路线时必须考虑的因素之一。这里主要介绍金属的力学性能。

金属在加工或服役过程中，都要承受各种不同外力的作用，当外力超过一定限度时，金属就会发生变形，甚至断裂。金属的力学性能是指金属在外力作用下抵抗变形与断裂的能力及发生变形的能力。这种能力的大小、强弱需用力学性能指标来衡量和比较，常用的力学性能指标有强度、塑性、硬度、韧性及疲劳极限等。

课题一 强度与塑性

任务提出

在现代桥梁设计制造中，金属悬索桥和斜拉桥是最为常见的结构形式，它不仅具有用料省、自重轻的特点，而且，还可以实现其他桥梁无法达到的大跨度结构。虽然我们现有的知识和能力，还不足以独立完成一座桥梁的设计工作，但通过对金属材料强度、塑性等力学性能的学习，可以使我们对其中金属工作组件的力学性能要求有一些初步的了解。

图 1-1 是悬索桥（吊桥）的结构示意图，试分析设计人员是如何保证桥梁的承载安全的？

任务分析

从图 1-1 中可以看出，悬索桥的桥体重量主要依靠“主索”（也称悬索或大缆）和“吊索”

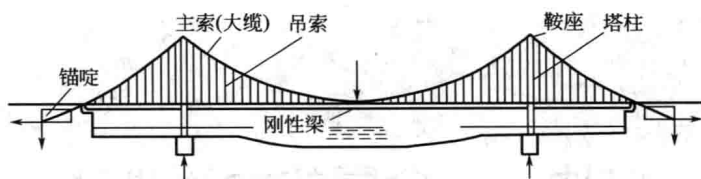


图 1-1 悬索桥结构示意图

(也称吊杆)吊拉,主索和吊索的承载能力是关键因素,它们在使用过程中不能产生变形,更不能发生断裂。主索和吊索的截面尺寸过小不能满足使用要求,截面尺寸过大又造成材料浪费,必须进行精确设计和计算,其设计依据就是所选用材料的强度和塑性等力学性能指标。

相关知识

一、载荷、变形与应力

1. 载荷

金属材料在使用和加工过程中所受到的各种外力统称为载荷,用符号 F 表示。载荷按其作用的性质不同,可分为静载荷、冲击载荷及交变载荷三种。

静载荷是指大小和方向不变化或变化缓慢的载荷,如钢丝绳吊起货物过程中所承受的载荷;在很短时间内作用于金属材料上的载荷称为冲击载荷,如冲床的冲头、风动工具等;交变载荷是指载荷大小,甚至方向随时间发生变化的载荷,如齿轮、弹簧等。

2. 变形

金属材料受到载荷作用而产生的几何变形和尺寸的变化称为变形。变形分为弹性变形和塑性变形。随载荷的存在而产生、随载荷的去除而消失的变形称为弹性变形。载荷去除后仍不能恢复的变形称为塑性变形。

3. 应力

金属材料在受到外力作用时,其内部作用着与外力相对抗的力,称为内力。单位面积上的内力称为内应力,内应力能够准确地反映金属材料内部的受力状态,因此,强度指标都是用应力表示的。生产中最常用、最基本的金属力学性能指标如屈服强度、抗拉强度、塑性等均是通过对单向静拉伸试验测定的。

二、金属室温静拉伸试验

单向室温静拉伸试验是在试样两端缓慢施加载荷,使试样的工作部分受轴向拉力,引起试样沿轴向伸长,直至拉断为止。它是应用最广泛的金属力学性能试验方法之一。

1. 拉伸试样

试验表明,所用试样的形状和尺寸及加工质量对其性能测试结果有一定影响。为了测定金属材料或零部件的拉伸性能并使金属材料拉伸试验的结果具有可比性,拉伸试样的形状和尺寸及取样和制样应符合《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010),常用拉伸试样如图 1-2(a) 所示。图中 d_0 是圆形截面试样的直径, L_0 为试样的有效工作部分称为原始标距。根据原始标距 (L_0) 与圆形截面试样直径 (d_0) 之间的关系,试样分长比例试样 ($L_0=10d_0$) 和短比例试样 ($L_0=5d_0$) 两种。拉伸试验时,一般优先选用短比例试样。

2. 拉伸曲线

试验前应先检查试样外观是否符合要求。试样原始标距一般采用细划线或细墨线进行标

定。拉伸试验机一般用液压万能试验机或电子万能试验机。

将拉伸试样安装在材料试验机上,缓慢且均匀施加轴向力 F ,观察并测定试样在外力作用下的变形过程,直至试样断裂为止。外力 F 与试样绝对伸长量之间的关系曲线称为力-伸长曲线。力-伸长曲线形象地描绘出材料的变形特征及各阶段受力与变形间的关系,可由该图形的形状来判断材料特性与塑性好坏,断裂时的韧性与脆性程度及不同变形情况下的承载能力。在拉伸试验时,利用试验机的自动绘图器可绘出力-伸长曲线。图1-2(b)所示是低碳钢力-伸长曲线($F-\Delta L$ 曲线),图中纵坐标为拉伸力 F ,横坐标是绝对伸长量 ΔL 。

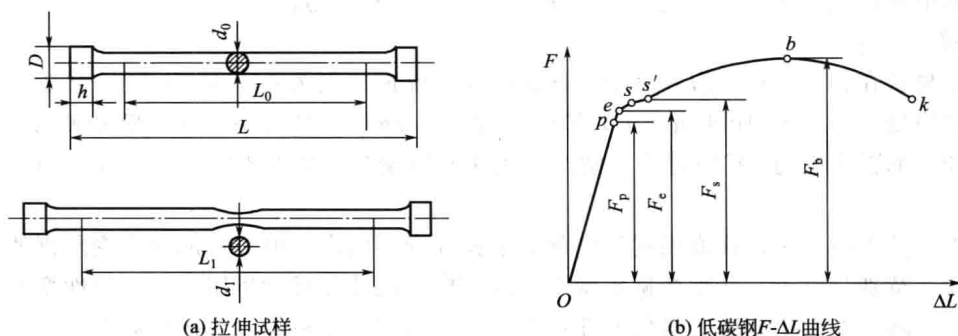


图 1-2 拉伸试样和低碳钢 $F-\Delta L$ 曲线

由图1-2(b)可知,试样伸长量随拉力增大而增加。拉伸力在 F_p 以下阶段(Op 段),试样在受力时发生变形,在此阶段中拉力和伸长成正比关系,卸除拉伸力后变形能完全恢复,该区段为完全弹性变形阶段。在曲线的 pe 段,伸长量与拉伸力不再成正比例关系,拉伸曲线也就不再成直线,但仍处于弹性变形阶段。一般来说 p 点和 e 点是很接近的,实际过程中 p 点和 e 点一般不易分辨。

当所加的拉伸力 F 超过 F_e 后,外力不增大或变化不大,试样仍继续伸长,开始出现明显的塑性变形。曲线上出现平台或锯齿(曲线 ess' 段),试验机示力盘上的主指针暂停转动或开始回转、来回摆动。现象表明试样所承受的拉力不继续增大或稍微减少的情况下试样却继续伸长,这种现象称为材料的屈服。

在曲线的 $s'b$ 段,外力增大,伸长沿整个试样长度均匀进行,继而进入均匀塑性变形阶段。同时随着塑性变形不断增加,试样的变形抗力也逐渐增加,产生形变强化,这个阶段是材料的强化阶段。

在曲线的最高点(b 点),达到最大拉伸力 F_b 时,试样再次产生不均匀的塑性变形,变形主要集中于试样的某一局部区域,该处横截面积急剧减小,结果就形成了所谓“缩颈”现象。随着缩颈处截面不断减小,承载能力不断下降,到 k 点时,试样发生断裂。

由此可知,低碳钢在拉伸力作用下的表现过程可分为弹性变形阶段、屈服阶段、均匀塑性变形阶段、缩颈(集中塑性变形阶段)和断裂阶段。正火、退火碳素结构钢和一般低合金结构钢,也都具有类似的力-伸长曲线,只是力的大小和伸长量变化不同而已。

并非所有金属材料都具有相同类型的力-伸长曲线,即使是同一材料在不同条件下其力-伸长曲线也不相同。工程上使用的金属材料,多数在断裂前没有明显的塑性变形。有些材料不仅没有屈服现象,而且也不产生“缩颈”现象。

3. 应力-应变曲线

力-伸长曲线只代表试样的力学性质,同一种材料的力-伸长曲线中,横、纵坐标会因试

样尺寸不同而各异。为了使同一种材料不同尺寸试样的拉伸过程及其特性点便于比较,以消除试样几何尺寸的影响,将力-伸长曲线的横、纵坐标分别用拉伸试样的原始标距长度 L_0 和原始横截面积 S_0 去除,则得到应力-应变曲线。因坐标数值均以一常数相除,故应力-应变曲线与力-伸长曲线形状相似,但消除了几何尺寸的影响。单向拉伸条件下的金属材料的力学性能指标就是在应力-应变曲线上定义的。如果试验能提供一条精确的应力-应变曲线,那么单向拉伸条件下的主要力学性能指标就可精确地确定。

三、金属的弹性变形

金属的弹性变形是一种可逆变形,弹性变形量一般不超过 $0.5\% \sim 1\%$ 。

1. 弹性模量

金属材料在弹性变形阶段,其应力 σ 和应变 ϵ 成正比例关系,即 $\sigma = E\epsilon$,其比例系数 E 称为弹性模量。在应力-应变曲线上, E 就是直线 (Op 段) 的斜率。弹性模量表示金属材料对弹性变形的抵抗能力, E 值越大,则产生相同的弹性变形量需要的外力越大,弹性变形越困难。

在工程技术中,机件在服役过程中都处于弹性变形状态,但过量的弹性变形则使机件丧失稳定性,特别是对于一些须严格限制变形的结构。机件在载荷作用下抵抗弹性变形的能力称为刚度。刚度的大小取决于机件的几何形状和材料的弹性模量。在机件截面积不变的情况下,机件的刚度就取决于材料的弹性模量。

2. 弹性极限

弹性极限是金属材料在外力作用下,只发生弹性变形而不发生塑性变形时所能承受的最大应力。在应力-应变曲线上,弹性极限相当于 e 点所对应的应力值,用 σ_e 表示。

弹性极限是金属材料由弹性变形过渡到弹-塑性变形时的应力,由于测试条件的限制,在工程测试中很难测出准确而唯一的数值,所以实际测量时是测量规定非比例伸长率时的应力。在《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010) 中称之为规定非比例延伸强度,并以脚注说明,用 R_p 表示。如测定试样标距部分的非比例伸长率 0.001% 时的应力,记为 $R_{p0.001}$ 。由此可见,弹性极限是表征最大弹性变形的抗力,或者说是表征微量塑性变形的抗力。

在实际工程应用中,几乎所有的弹性元件在工作时都不允许产生微小的塑性变形,只允许在弹性范围内工作。为此,弹性极限就成了这些零件的失效抗力指标。如测力弹簧就是依靠其应力与应变成正比关系来显示负荷值的大小。制造这类工件的材料应以能保持弹性变形按正比变化的最大抗力作为失效抗力指标。

3. 弹性比功

弹性比功是表示金属材料吸收弹性变形功的能力,一般用金属开始塑性变形前单位体积吸收的最大弹性变形功表示。金属拉伸时的弹性比功可表示为

$$\alpha_e = \frac{\sigma_e^2}{2E}$$

式中 α_e ——弹性比功;

σ_e ——弹性极限;

E ——弹性模量。

由上式可知,提高材料的弹性比功有两种途径:一是提高弹性极限 σ_e ,二是降低弹性模量 E 。但弹性模量是对组织不敏感的指标,金属材料的合金化和热处理对它影响不大。因此对于一般金属材料,只有提高弹性极限的方法才能提高弹性比功。但是要提高一个具体零

件的弹性比功,除采取提高弹性极限或降低弹性模量外,还可以增加零件的体积。

弹簧是典型的弹性零件,其重要作用是减震和储能驱动等。因此,弹簧在弹性范围内应有尽可能高的弹性比功,以便在弹性过程吸收弹性变形功,将其转变为弹性能储存在弹簧内部。

四、强度与强度指标

1. 强度及其意义

强度是指金属材料抵抗塑性变形或断裂的能力,是工程技术上重要的力学性能指标。根据载荷性质不同,材料强度有静强度、疲劳强度等。这里主要介绍生产中常用的单向静拉伸条件下的强度指标。

材料强度的大小,通常用单位面积所受的力来表示,其单位为 MPa。强度越高,相同截面积的材料在工作时所能承受的载荷就越大。当载荷一定时,选用高强度的材料,就可以减小机件的截面尺寸,从而减小其自重,对于汽车、船舶等交通运输工具的意义更加突出。

2. 屈服强度

金属在单向拉伸试验过程中,当应力超过弹性极限后,变形增加较快,此时除了弹性变形外,还产生部分塑性变形。随后在外力不增加或上下波动的情况下,试样仍能继续伸长变形,在力-伸长曲线上出现一个波动的小平台,这便是屈服现象。金属材料拉伸试样发生屈服现象时,力所对应的点称为屈服点。用应力表示的屈服点称为屈服强度。

屈服现象是材料在拉伸时开始塑性变形的一个标志。屈服强度可以理解为金属材料开始产生明显塑性变形的最小应力值,其实质是金属材料对初始塑性变形的抗力。

屈服强度用符号 σ_s 表示,在《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)中,用 R_{eL} (下屈服强度)选作为屈服强度指标。计算公式如下

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0}$$

式中 σ_s ——屈服点, MPa;

F_s ——试样屈服时的载荷, N;

S_0 ——试样原始横截面积, mm^2 。

有些金属材料(如高碳钢、黄铜等)在拉伸试验时无明显的屈服现象,对于这类材料用规定微量塑性伸长应力表征材料对微量塑性变形的抗力。规定微量塑性伸长应力是人为规定拉伸试样标距部分产生一定的微量塑性伸长率(如 0.01%、0.02%、0.2%等)时的应力。一般用试样发生 0.2% 塑性伸长率时的应力,称为条件屈服强度,用 $\sigma_{0.2}$ 表示。新标准中用 $R_{0.2}$ 表示。

在生产实际中,绝大部分工程构件和机器零件在其服役过程中都处于弹性变形状态,不允许有明显的塑性变形产生。屈服强度是工程技术上重要的力学性能指标之一,也是大多数工程构件和机器零件选材和设计的依据。传统的设计方法,对于韧性材料以屈服强度为标准,规定许用应力 $[\sigma] = \sigma_s / n$ (或 $[\sigma] = R_{eL} / n$),一般安全系数 n 取 2 或更大。

3. 抗拉强度

在金属试样力-伸长曲线上极大值点 b 点之前,塑性变形是均匀的,因为材料变形强化使试样承载能力增加,可以补偿试样截面减少时其承载能力的下降。在 b 点之后,由于形变强化跟不上塑性变形的发展,使变形集中于试样局部区域产生缩颈。在此区域内横截面越来越细,局部应力越来越高,直至断裂。

试样在断裂前所能承受的最大应力称为抗拉强度,又称强度极限,用符号 σ_b 表示,

GB/T 228—2010 规定抗拉强度符号用 R_m 表示, 按下列公式计算

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0}$$

式中 σ_b ——抗拉强度, MPa;

F_b ——试样承受的最大载荷, N;

S_0 ——试样原始横截面积, mm^2 。

抗拉强度的物理意义是韧性材料抵抗大量均匀塑性变形的能力。铸铁等脆性材料拉伸过程中一般不出现缩颈现象, 抗拉强度就是材料的断裂强度。

断裂是零件最严重的失效形式, 所以, 抗拉强度也是工程设计和选材的主要指标, 特别是对脆性材料而言。

屈服强度与抗拉强度的比值 (σ_s/σ_b 或 R_{eL}/R_m) 称为材料的屈强比。屈强比越小, 表明材料的屈服强度与抗拉强度的差距越大, 即塑性越好, 万一超载, 由于塑性变形的产生使金属材料的强度提高而不致立即破坏, 从而保证了使用中的安全性, 但屈强比太小, 使材料强度的有效利用率低; 相反屈强比高, 说明屈服强度接近抗拉强度, 材料在断裂前塑性“储备”太少, 对应力集中敏感, 安全性能下降。合理的屈强比一般在 0.6~0.75 之间。

当材料受到压应力、弯曲应力及扭转应力等时, 其抵抗破坏能力分别称为抗压强度 (σ_{bc} 或 R_{mc})、抗弯强度 (σ_{bb}) 及抗扭强度 (τ_m) 等, 单位与抗拉强度相同。

五、塑性与塑性指标

1. 塑性

塑性是金属材料断裂前产生塑性变形的能力。

金属材料断裂前产生的塑性变形由均匀塑性变形和集中塑性变形 (缩颈) 两部分组成。大多数拉伸时形成缩颈的韧性金属材料, 其均匀塑性变形量比集中塑性变形量要小很多。也就是说, 拉伸缩颈形成后, 塑性变形主要集中于试样缩颈附近。

为比较和评定金属材料的塑性变形能力, 绝大部分机械制造用钢都是采用光滑的圆试样, 在静拉伸试验机上作单向精拉伸试验, 根据拉断后试样的断后伸长率和断面收缩率作为鉴定塑性变形能力大小的指标。

2. 断后伸长率

断后伸长率是指试样拉断后标距的残余伸长量与原始标距的百分比。用符号 δ 表示, 新标准 GB/T 228—2010 规定用符号 A 表示, 其计算方法如下

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中 δ ——断后伸长率, %;

L_1 ——试样拉断后的标距长度, mm;

L_0 ——试样的原始标距长度, mm。

必须指出, 同一材料的试样长短不同, 测量的断后伸长率略有不同, 用短试样测得的断后伸长率略大于用长试样测得的断后伸长率。长试样和短试样分别用 δ_{10} 和 δ_5 表示, 习惯上 δ_{10} 也常写成 δ 。

3. 断面收缩率

断面收缩率是指试样拉断处横截面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比, 用符号 ψ 表示, GB/T 228—2010 规定用符号 Z 表示。其计算方法如下

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\%$$

式中 ψ ——断面收缩率, %;

S_0 ——试样的原始横截面面积, mm^2 ;

S_1 ——试样拉断处的最小截面面积, mm^2 。

根据断后伸长率和断面收缩率的相对大小, 可以判断金属材料拉伸时是否形成缩颈。若材料的断后伸长率大于或等于断面收缩率, 则该材料只有均匀变形而无缩颈现象, 是低塑性材料; 反之, 则有缩颈现象, 是高塑性材料。

任何零件都要求材料具有一定的塑性。很显然, 断后伸长率(δ)与断面收缩率(ψ)越大, 发生的塑性变形量越大, 也就是材料的塑性越好。

塑性好的金属材料可以发生大量塑性变形而不破坏, 便于通过各种压力加工方法(锻造、轧制、冷冲压等)获得形状复杂的零件或构件。例如, 低碳钢的 δ 可达30%, ψ 可达60%, 可以拉成细丝, 轧成薄板, 进行深冲成形。而铸铁的 δ 和 ψ 几乎为零, 所以不能进行塑性加工。

工程构件或机械零件在使用过程中虽然不允许发生明显塑性变形, 但在偶尔过载时, 塑性好的材料能在过载处产生塑性变形, 由于产生形变强化使承载能力增加, 而不至于突然断裂, 因此比较安全。

一般情况下, 强度与塑性是一对相互矛盾的性能指标。在金属材料的工程应用中, 要提高强度, 就要牺牲一部分塑性。反之要改善塑性, 就必然牺牲一部分强度。但通过细化金属材料的显微组织, 可以同时提高材料的强度和塑性。

任务实施

悬索桥承载安全分析

① 桥梁承载安全分析。根据以上知识, 为了保证悬索和吊索在使用过程中不产生塑性变形, 设计人员要以屈服点 σ_s 或屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 为设计依据, 根据各悬索、吊索的受力大小和所选用材料的屈服点 σ_s 或屈服强度 $\sigma_{0.2}$, 确定其尺寸。计算过程如下

$$\sigma_s = F_s / S_0; S_0 = F_s / \sigma_s; d_0^2 = 4S_0 / \pi; d_0 = \sqrt{4S_0 / \pi}$$

由于各种桥梁用金属材料都具有良好的塑性, 在受力过大时, 首先产生塑性变形, 其变形抗力(即强度)会因加工硬化而自然提高, 不至于发生突然断裂, 保证桥梁安全可靠。

② 在实际设计中, 为了确保桥梁使用安全, 还应适当增大金属材料的截面尺寸, 具体办法将在相关学科中详细介绍。

综合训练

1. 解释下列名词:

(1) 拉伸试验 (2) 刚度 (3) 弹性极限 (4) 屈服现象 (5) 强度 (6) 屈服强度 (7) 抗拉强度 (8) 塑性 (9) 断后伸长率 (10) 断面收缩率

2. 说明下列力学性能指标的意义:

(1) E (2) $\sigma_e(R_P)$ (3) $\sigma_s(R_{eL})$ (4) σ_b (5) δ (6) ψ (7) $\sigma_s/\sigma_b(R_{eL}/R_m)$

3. 什么是金属的力学性能? 金属的力学性能有哪些?

4. 简述低碳钢拉伸试验的基本过程。

5. 弹性极限、屈服强度、抗拉强度在工程上各有什么实际意义?